

# Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón.

**Beatriz Piedecausa García.** *Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante.*

**Servando Chinchón Payá.** *Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad de Alicante.*

**Miguel Angel Morales Recio.** *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).*

**Miguel Angel Sanjuán Barbudo.** *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).*

*El presente artículo analiza aspectos relacionados con los tipos de radiactividad natural presentes en el interior de las edificaciones, sus fuentes y sus influencias. Más concretamente, desarrolla el estudio de la radiactividad ambiental en el interior de los espacios construidos debida a la presencia del gas radón, así como sus fuentes de origen y los niveles recomendados. Este es un artículo que se presenta como la segunda parte de un trabajo sobre radiactividad natural en los materiales de construcción, cuya primera parte hace referencia a la radiación externa de dichos materiales y se publica por los mismos autores, en esta misma revista.*

*Al mismo tiempo, se realiza un recorrido por el marco normativo, tanto internacional como nacional, relativo al radón y a sus descendientes de vida media corta.*

*El presente trabajo es parte de la tesis doctoral de la primera autora del mismo, Beatriz Piedecausa García, a quien el resto de autores agradece su esfuerzo para preparar el texto que ahora se publica y la autorización y las facilidades ofrecidas para acceder a su trabajo.*

## 1. La exposición a radiación interna. El gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

El siguiente artículo se presenta como la segunda parte de un trabajo sobre la radiactividad natural de los materiales de construcción.

En la primera parte del trabajo se hace referencia a la radiación externa emitida de manera natural por distintos materiales de construcción y, en sus apartados 1.1 y 1.2, se establecen definiciones, magnitudes y unidades de medida de los términos que presentan un especial interés en relación con las radiaciones ionizantes.

En esta segunda parte del trabajo se desarrollan aspectos relacionados con la exposición a la radiación interna debida al gas radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) emanado por distintos materiales utilizados en construcción.

## 1.1 Definición y orígenes

El Radón es un gas noble radiactivo e inerte (resistente a reaccionar químicamente), incoloro, inodoro, insípido e invisible, más pesado que el aire y soluble en agua u otros líquidos. Existen tres isótopos principales de radón procedentes de tres grandes cadenas radiactivas de origen natural:

- La del uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ) en la que se forma radio-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) que se transforma en radón 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) o Radón.  
 $(^{238}\text{U}) \rightarrow (^{226}\text{Ra}) \rightarrow (^{222}\text{Rn}) \rightarrow (^{206}\text{Pb})$
- La del uranio 235 ( $^{235}\text{U}$ ) da origen al radio-223 ( $^{223}\text{Ra}$ ) que se desintegra en radón 219 ( $^{219}\text{Rn}$ ) o Actinón.  
 $(^{235}\text{U}) \rightarrow (^{223}\text{Ra}) \rightarrow (^{219}\text{Rn}) \rightarrow (^{207}\text{Pb})$
- La del torio 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) que produce radio-224 ( $^{224}\text{Ra}$ ) que pasa a ser radón 220 ( $^{220}\text{Rn}$ ) o Torón.  
 $(^{232}\text{Th}) \rightarrow (^{224}\text{Ra}) \rightarrow (^{220}\text{Rn}) \rightarrow (^{208}\text{Pb})$

En cada una de las series radiactivas existe un isótopo del gas radón que escapa del material natural y se incorpora a la atmósfera en forma de radón-222, radón-219 y radón-220 respectivamente. De estas tres formas químicas, la que se encuentra en mayor proporción en la naturaleza es la primera de ellas denominada radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), teniendo importante trascendencia para la salud puesto que aporta en torno al 50% de toda la dosis de radiación natural que recibe el ser humano.

El Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) es un gas descendiente directo del Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ). Este Radio es descendiente del Torio ( $^{230}\text{Th}$ ) procedente a la vez de la desintegración del Uranio ( $^{234}\text{U}$ ) y si seguimos la cadena en orden inverso se llegará hasta el Uranio ( $^{238}\text{U}$ ),

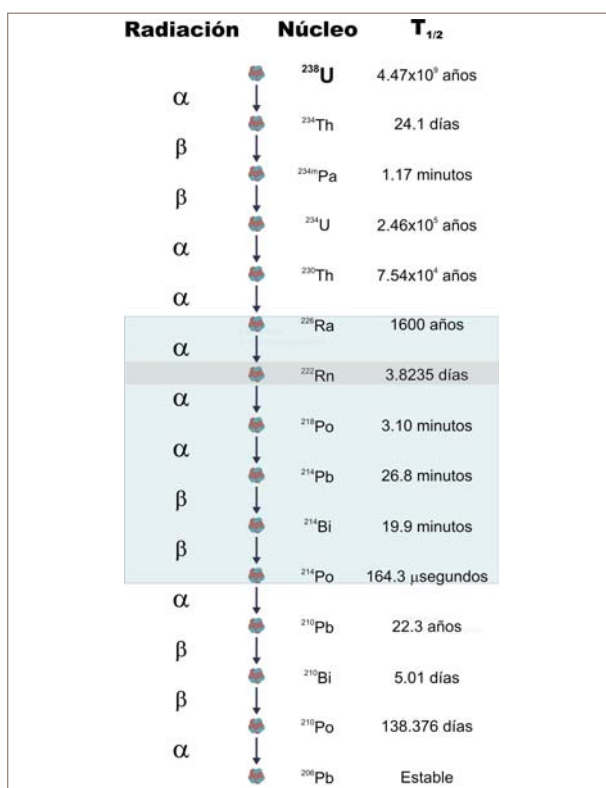
■ **Figura 1. Series radiactivas naturales.** (Fuente: NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. Notas Técnicas de Prevención).

$^{232}_{90}\text{Th}$	$\rightarrow$	$^{224}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow$	$^{220}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow$	$^{208}_{82}\text{Pb}$
$^{238}_{92}\text{U}$	$\rightarrow$	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow$	$^{222}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow$	$^{206}_{82}\text{Pb}$
$^{235}_{92}\text{U}$	$\rightarrow$	$^{223}_{88}\text{Ra}$	$\rightarrow$	$^{219}_{86}\text{Rn}$	$\rightarrow$	$^{207}_{82}\text{Pb}$

que se encuentra diseminado por la corteza terrestre siendo un elemento abundante en la naturaleza en una proporción 40 veces mayor a la de la plata y 800 veces mayor a la del oro.

Por tanto, se puede afirmar que donde exista Uranio inicial ( $^{238}\text{U}$ ) encontraremos también Radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y en consecuencia Radón ( $^{222}\text{Rn}$ ), estando presente sobre todo en subsuelos graníticos o en algunos suelos volcánicos y en las aguas que se acumulan o transcurren por ellos, generando una distribución muy irregular en todo el planeta que varía aleatoriamente según las épocas del año o incluso de un día a otro.

■ **Figura 2. Serie de desintegración radiactiva del Uranio-238.** (Fuente: propia a partir de la NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención).



De este modo, el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) se encuentra en casi todos los tipos de suelo o aguas. Tiene un período de semidesintegración de 3,8 días y en su proceso de desintegración desde los elementos inestables hasta el isótopo estable Pb-206, el gas radón produce unos descendientes sólidos con vidas medias inferiores a 30 minutos como son el Po-218, Pb-214, el Bi-214 y el Po-214 (marcados en azul en la imagen de la Figura 2).

En el aire ambiental, tras la desintegración del radón, sus descendientes sólidos de vida media corta se pueden fijar a partículas de aerosoles presentes en el aire, pudiendo deducirse en ciertos casos la concentración del radón a partir de la concentración existente de sus descendientes. De este modo, se considera que 1 Bq(EER)/ $\text{m}^3$  de descendientes de vida media corta del radón equivale a 2 Bq (radón gas)/ $\text{m}^3$ , considerando las siglas EER como "equilibrium equivalent of radon".

Por otra parte, también cabe destacar que tras la inhalación de gas radón por el ser humano, su desintegración dentro de nuestro sistema respiratorio da lugar a los citados descendientes sólidos dentro del mismo que, tras fijarse a los distintos tejidos y continuar desintegrándose, emiten radiaciones que pueden dañar a las células más próximas y desembocar en enfermedades cancerígenas.

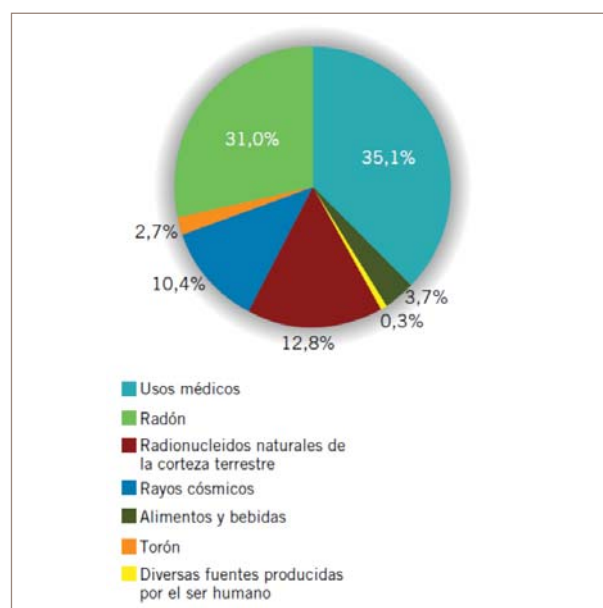
## 1.2 Riesgos del $^{222}\text{Rn}$

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR), el radón representa aproximadamente la mitad del promedio mundial de exposición del ser humano a fuentes naturales de radiación, siempre considerando que existe una gran variabilidad debido a su irregular distribución geográfica.

Los daños producidos por este tipo de radiaciones en el ser humano dependen de muchos factores como son la naturaleza y la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición, la energía cedida, la superficie irradiada o la dosis de radiación; siendo más perjudicial el efecto si se recibe la misma radiación en un periodo de tiempo corto que en un tiempo mayor. Según datos Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la dosis que una persona recibe como promedio en España proveniente de fuentes naturales es de 2,41 mSv/año; cantidad que en condiciones normales y como promedio se estima que se distribuye en:

- Un 50% de la dosis procedente del radón.
- Un 20% de la dosis procedente de la radiación terrestre (materiales).
- Un 15% de la dosis procedente de la radiación cósmica.
- Un 15% de la dosis procedente del propio organismo.

■ **Figura 3. Contribución de las distintas fuentes de exposición de origen natural y artificial a la dosis de radiación promedio recibida en un año por una persona cualquiera de la población de España.** (Fuente: CSN. Dosis de Radiación).



Dosis que, al provenir de fuentes naturales (Figura 3), son muy variables y dependen de factores como el lugar de residencia, el tipo de vivienda, la altitud sobre el nivel del mar, el régimen alimentario o los hábitos de vida en general.

### 1.3 Niveles ambientales y dosis corporales de <sup>222</sup>Rn

Debido a que el radón está presente de forma natural en el medio ambiente, el establecimiento de niveles mínimos a partir de los cuales se deben tomar medidas correctoras es complejo y dificultoso. Es por esto que, según el país de origen, existen valores distintos como consecuencia de su problemática particular, su capacidad de acción y la sensibilidad pública existente, generando recomendaciones constructivas adaptadas a las características propias del lugar y normativas limitadoras del nivel de radón en edificios de nueva construcción.

Estos valores han sido objeto de mayor regulación en los países nórdicos o con temperaturas medias bajas, puesto que en ellos se tiende al ahorro calorífico con viviendas muy herméticas y a la estanqueidad de puertas y ventanas, impidiendo la renovación de aire exterior y consiguiendo concentraciones de radón decenas e incluso cientos de veces superiores a los niveles de peligrosidad recomendados por los organismos internacionales. Problema que se reduce en zonas más cálidas y bien ventiladas.

Niveles que, a pesar de ser recomendados, no deben entenderse como frontera entre 'niveles seguros' y 'niveles no seguros' siendo siempre deseable minimizar al máximo la concentración de radón en las viviendas mediante las medidas necesarias ya que cuanto más alta sea, mayor será el riesgo de afección a los usuarios.

### Niveles de <sup>222</sup>Rn en el ambiente

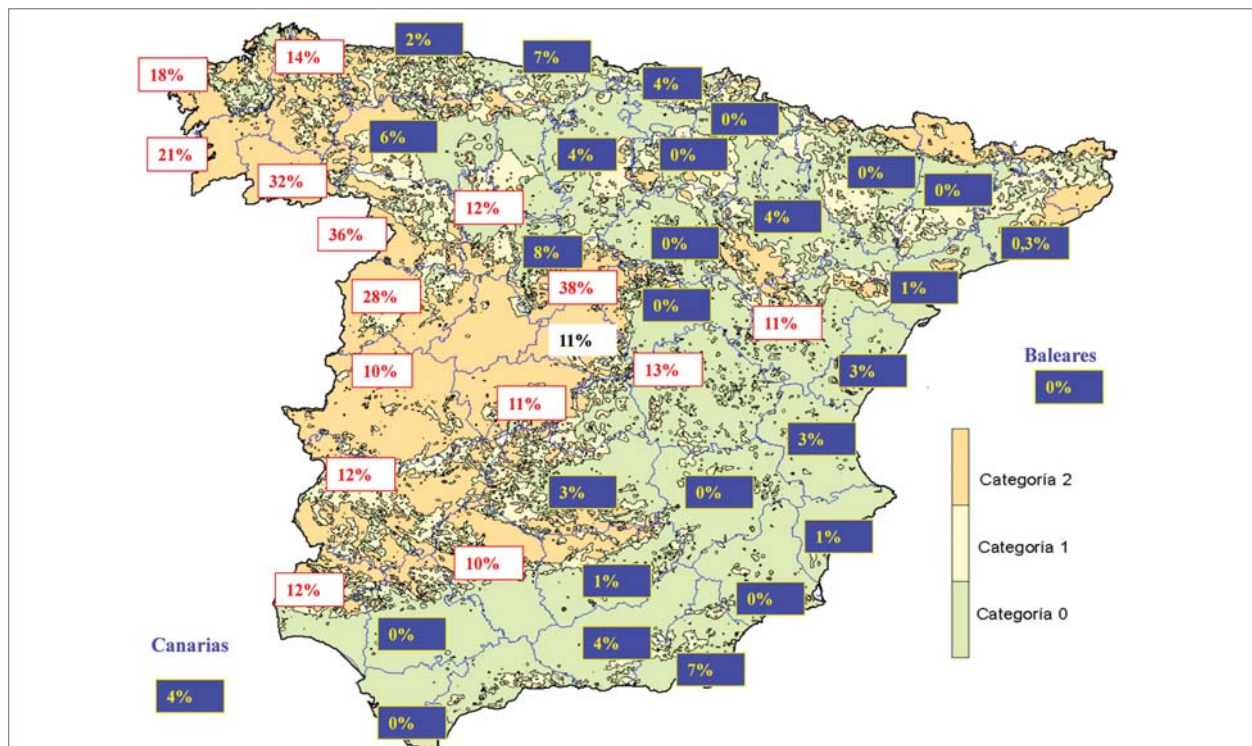
Respecto a los niveles máximos de radón aconsejables en espacios interiores, la Unión Europea recomienda a sus estados miembros según la 90/143/Euratom un nivel de acción de 400 Bq/m<sup>3</sup> para iniciar acciones de remedio en viviendas ya existentes y un nivel de radón objetivo en la fase de diseño inferior a 200 Bq/m<sup>3</sup> en viviendas de nueva construcción.

Por otra parte, en países como EE.UU. o Reino Unido se recomiendan niveles de acción de radón más bajos para todo tipo de viviendas, no superando los 148 Bq/m<sup>3</sup> (4 pCi/L) y 200 Bq/m<sup>3</sup> respectivamente; si bien es cierto que en EE.UU. existe una mayor definición en cuanto a las actuaciones a tomar, estableciendo intervenciones graduales para mitigar el problema en función de las concentraciones existentes, determinando períodos máximos para su reducción (años, meses o semanas).

Hoy en día es posible reducir el nivel de radón fácilmente a 75 Bq/m<sup>3</sup> en la mayoría de las viviendas, dato importante, ya que según la OMS el riesgo de padecer cáncer de pulmón aumenta en un 16% por cada incremento de 100 Bq/m<sup>3</sup> en la concentración de radón, siguiendo una relación lineal de dosis-respuesta, es decir, que el riesgo aumenta proporcionalmente con el aumento de exposición.

Por último, cabe destacar que, aunque una cierta cantidad de radón en el aire se considera normal, ningún nivel de radón es absolutamente seguro. En España según el CSN el nivel promedio ronda los 24 Bq/m<sup>3</sup>, siendo interesante comentar la existencia de zonas con altas concentraciones de radón que llegan incluso a sobrepasar la recomendación de los 400 Bq/m<sup>3</sup>. Según

■ Figura 4. Categorías de exposición potencial al radón en España. Proyecto Marna. (Fuente: Figueiras, A. (2010)).



se indica en la publicación Real, G. (2002), el porcentaje de viviendas que superan esa recomendación son aproximadamente: Castilla y León (30%), Madrid-Sierra de Guadarrama (17%), Galicia (11%), Andalucía (4%), Extremadura (4%), Canarias (4%) o Aragón (3%).

## Dosis de <sup>222</sup>Rn en los habitantes

Según el Consejo de Seguridad Nuclear la dosis media de radiación total (natural y artificial) a la que está expuesta la población española se estima en 3,7 mSv/año. De ellos, 2,41 mSv/año (el 65%) se deben al denominado fondo radiactivo natural (generado por la radiación terrestre, la radiación cósmica, los isótopos ingeridos junto con el agua y los alimentos y los inhalados principalmente con el <sup>222</sup>Rn y sus descendientes), aunque lo cierto es que este valor varía de unas zonas a otras.

Las diferencias observables en la Figura 4 son debidas a distintas causas, como por ejemplo a que las radiaciones cósmicas procedentes del espacio exterior aumentan con la altitud (existe un 20% más de dosis en las montañas que a nivel del mar) y con la latitud (mayores dosis en los polos que en el ecuador). Geológicamente, cabe destacar que la presencia en el terreno de determinados minerales también afecta al campo de radiación originado, concretamente la existencia de rocas ígneas y metamórficas conteniendo trazas de materiales radiactivos como uranio o radio.

Por tanto, a nivel internacional se establecen unos límites de dosis anuales recomendadas en el ser humano, planteando así una protección frente a la exposición excesiva a las radiaciones ionizantes; valores que nunca deben ser sobrepasados y que se aplican a la suma de las dosis recibidas por exposición externa e interna en un periodo considerado, teniendo en cuenta factores de ponderación que dependen del órgano irradiado y del tipo de radiación de la que se trate.

En España, según el CSN la dosis media procedente del radón es de 1,15 mSv/año, pudiendo alcanzar valores de hasta 40 mSv/año en áreas concretas. Estas dosis pueden ascender de cinco a diez veces más en ciertos espacios interiores puesto que, al contrario que ocurre en el exterior, la concentración aumenta debido a la carencia de ventilación de aire, dando lugar a un valor medio que depende de las características geológicas de la zona, en ciertos casos de los materiales de construcción empleados y de la ventilación de los locales.

■ **Tabla 1. Límites de dosis de exposición ocupacional. (RD 783/2001). (Fuente: NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. Notas Técnicas de Prevención).**

DOSIS EFECTIVA <sup>1</sup>	Personas profesionalmente no expuestas	Público, aprendices y estudiantes (menores de 16 años) <sup>2</sup>	1 mSv/año oficial
DOSIS EQUIVALENTE	Personas profesionalmente no expuestas	Público, aprendices y estudiantes (menores de 16 años)	
		Cristalino	1 mSv/año oficial
		Piel <sup>3</sup>	1 mSv/año oficial

(1) Dosis efectiva: suma de las dosis equivalentes ponderadas en todos los tejidos y órganos del cuerpo procedentes de irradiaciones internas y externas.

(2) Excepcionalmente se podrá superar este valor, siempre que el promedio durante 5 años consecutivos no sobrepase 1 mSv por año.

(3) Calculando el promedio en cualquier superficie cutánea de 1 cm<sup>2</sup>, independientemente de la superficie expuesta.

En la actualidad, la exposición ocupacional es la única que está regulada actualmente en España. Dentro del Real Decreto 783/2001 se regula la exposición al público que accede a distintas instalaciones con unas dosis máximas según el cuadro de la Tabla 1.

## 1.4 Fuentes de exposición

El interés por la acumulación de radón en las viviendas plantea un mayor desarrollo a finales de los años 70, cuando se convierte en una de las causas asociadas al síndrome del edificio enfermo (SEE) ("Sick Building Syndrome") que respondía a un deterioro biológico de los materiales debido a hongos, ácaros, etc.; a un deterioro físico debido a ruidos, mala ventilación, etc., o a un deterioro químico debido al CO<sub>2</sub>, radón, asbestos, etc. Un problema ampliamente extendido en nuestras construcciones, habiéndose estimado por la Organización Mundial de la Salud que el 30% de los edificios de los países industrializados resultan afectados por este tipo de deficiencias.

Además de estas patologías relacionadas con las propias construcciones existen otros condicionantes sociológicos que agravan la situación ya que la creciente permanencia del hombre urbano en ambientes cerrados, donde pasa el 75% de su tiempo llegando incluso hasta el 90% en el caso de niños, ancianos o enfermos crónicos, ha provocado un creciente interés en el estudio de las condiciones ambientales interiores, especialmente las que puedan tener efectos significativos sobre la salud, con el fin de poder evitarlas.

Por ello, en los últimos años tanto la comunidad científica como el público en general se han interesado por el peligro que el gas radón puede tener para la salud de los usuarios de viviendas con concentraciones altas. Niveles que al aire libre son generalmente muy bajos en torno a 10 Bq/m<sup>3</sup> pero que en interiores aumentan de valor, fundamentalmente en lugares poco ventilados, minas, cuevas o instalaciones de tratamiento de agua.

Así, parece preciso establecer las distintas fuentes de exposición de radón puesto que, debido a ser un gas presente en el aire, es capaz de entrar en los edificios y permanecer atrapado en su interior favoreciendo la generación de problemas de salud en sus habitantes. Dichas fuentes de exposición son fundamentalmente:

### 1.4.1 El terreno

Es la principal fuente emisora de radón en la naturaleza, siendo más habitual su influencia en construcciones aisladas o en las plantas bajas de edificios. Así, con la existencia de concentraciones medias de radio Ra-226 en suelos entre los 10 y 50 Bq/kg, el radón gaseoso procedente de los materiales en el terreno pasa al interior de las viviendas por difusión molecular; proceso que puede ser acelerado por las diferencias de presión existentes entre el gas del terreno y el aire del interior de la estancia.

A nivel general, son los terrenos graníticos, los yesos fosfatados y los terrenos uraníferos los que presentan los niveles más altos de este gas, que al pesar siete veces más que el aire, tiende a concentrarse en los sótanos y los bajos de las viviendas a través de grietas y resquicios en paredes o canalizaciones.

Además, la presencia de extractores de ventilación o mecanismos de calefacción en el edificio provoca que se generen corrientes de aire y movimientos inducidos que incrementan el paso de radón desde el suelo hasta las habitaciones a través de poros y fisuras existentes en la propia estructura, lo que explica las elevadas concentraciones que se han llegado a encontrar en algunos casos concretos en interiores.

Debido a que el principal foco de radón es el propio terreno en la mayoría de los casos y considerando que el radón es un descendiente del Uranio y del Torio, el potencial del terreno como emisor de radón dependerá de la cantidad de ambos, siendo además habitual que exista una importante presencia de radio.

Así, tras su exhalación el radón se acumulará en mayor proporción si el terreno es rico en uranio, puesto que su larga vida media de 4.500 millones de años provocará que siempre haya uranio por transformarse en radón. Es por ello que, la concentración de radón en un domicilio tendrá leves altibajos y persistirá durante la existencia de la casa en cuestión siempre que no se modifiquen las características estructurales de dicha vivienda.

Por otra parte, también es importante considerar que las medidas realizadas en terrenos de diferente naturaleza indican que, para que la concentración de radón sea elevada, los suelos no sólo han de poseer un buen potencial emisor sino que además han de permitir la salida del radón a través de ellos.

■ **Tabla 2. Fuente: laboratorio de radón de Galicia. Partes por millón (ppm) = miligramos de una sustancia/ L de disolución (medida de concentración de una solución).**

MATERIA	URANIO 238 (en ppm)	TORIO 232 (en ppm)
Rocas areniscas	0,5	1,7
Rocas carbonatadas	0,5	1,7
Rocas basálticas	1	4
Suelo	1	6
Arcillas	3,5	11
Rocas graníticas	5	12

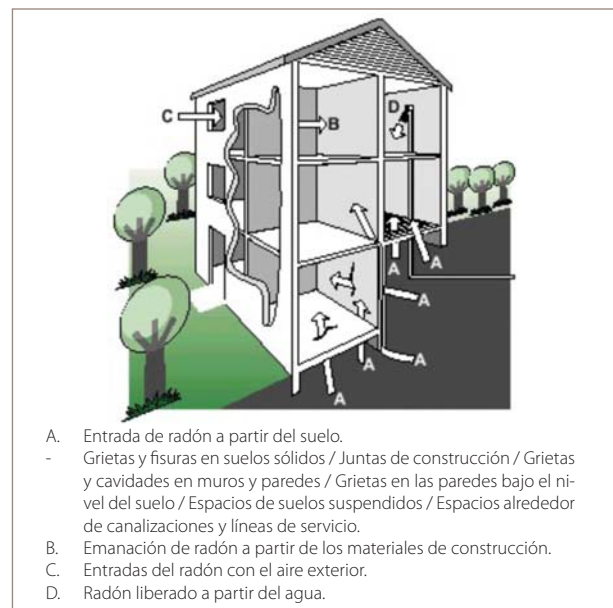
Esto es posible en el caso de terrenos suficientemente fracturados y suficientemente porosos o permeables, donde la existencia de un mineral muy envejecido o con presencia de grietas o fallas, aumenta la difusión y por tanto la exhalación de radón.

También cabe destacar que las condiciones meteorológicas son otro de los factores que influyen en la emanación del radón en el terreno mediante:

- Un aumento de exhalación con la existencia de bajas presiones atmosféricas y a la inversa.
- Una reducción de exhalación con lluvia y nieve, lo que conlleva una maximización de la concentración de radón en el terreno en invierno.
- Un aumento de la exhalación con la existencia de altas velocidades de viento.
- Un aumento de la exhalación con el aumento de temperaturas.

■ **Figura 5. Típicas fuentes de radón y rutas de entrada.**

(Fuente: NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención).



- A. Entrada de radón a partir del suelo.
  - Grietas y fisuras en suelos sólidos / Juntas de construcción / Grietas y cavidades en muros y paredes / Grietas en las paredes bajo el nivel del suelo / Espacios de suelos suspendidos / Espacios alrededor de canalizaciones y líneas de servicio.
- B. Emanación de radón a partir de los materiales de construcción.
- C. Entradas del radón con el aire exterior.
- D. Radón liberado a partir del agua.

### 1.4.2 Los materiales de construcción

A nivel general se estima que los materiales de construcción puedan aportar un 20% de la concentración total de radón en domicilios, aproximadamente, lo que representa una cantidad aportada comprendida entre 10 Bq/m<sup>3</sup> y 20 Bq/m<sup>3</sup> que, si no existieran aportaciones de radón provenientes del terreno, están muy alejadas de los valores límite aceptables de 400 Bq/m<sup>3</sup> para edificios existentes y 200 Bq/m<sup>3</sup> para edificios nuevos, como se indica más adelante al hacer referencia a las Recomendaciones de la Comunidad Europea (Recomendación 90/143). Los principales elementos radiactivos presentes en los materiales de construcción son el radio (<sup>226</sup>Ra), el Torio (<sup>232</sup>Th) y el Potasio (<sup>40</sup>K), con unas concentraciones que varían en función de distintos factores como la propia concentración de radio en el material, su porosidad, la preparación de la superficie o el acabado exterior.

En general, los valores de las concentraciones de actividad típicas del hormigón (véase la Tabla 6 de la primera parte) 40 Bq/kg en  $^{226}\text{Ra}$  y 30 Bq/kg en  $^{232}\text{Th}$  hacen que este material no sea considerado como fuente de radiación a considerar. Cuando se superan los valores anteriormente indicados se comprobará que el hormigón no aporta una concentración de radón tal que la total que pueda existir en el interior del edificio supere 200 Bq/m<sup>3</sup>. Esta comprobación se realizará con cualquier material que pueda aportar una cantidad de radón adicional a aquella que pueda existir en el edificio por otras fuentes.

Algunos de los materiales de construcción que liberan radón emplean, en su composición, residuos industriales como las escorias de alto horno, las cenizas volantes, u otros materiales tales como las piedras naturales, como el granito o la pizarra, los ladrillos, el cemento portland, la arena, la grava, el yeso natural y, en niveles mínimos en España, la madera. Además, es importante tener en cuenta que pueden existir productos como los ladrillos y los hormigones con concentraciones elevadas de radón si los materiales base de los que están compuestos se han extraído de zonas con alta radiación natural, como es el caso de algunas tobas volcánicas o puzolanas. Es posible encontrar entre los materiales de construcción contenidos de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  de hasta 50 Bq/kg, cantidades que pueden aumentar con composiciones de las citadas anteriormente.

### 1.4.3 El aire exterior

Debido a su bajo contenido en radón, normalmente el aire exterior actúa como un factor de dilución. Sin embargo, en zonas con elevada concentración de radón en aire y edificios construidos con materiales con bajo contenido en radio, el aire exterior puede actuar propiamente como una fuente que aporta radón.

En estos casos, la concentración de radón en el aire exterior está relacionada fundamentalmente con la presión atmosférica, oscilando habitualmente entre unos valores en condiciones estables. A nivel general, los valores más altos se producen durante la noche y con unos valores medios para el radón de 10 Bq/m<sup>3</sup> en áreas continentales y aproximadamente 0,1 Bq/m<sup>3</sup> en las zonas costeras y oceánicas.

### 1.4.4 El agua de consumo

Finalmente, cabe comentar que la utilización de aguas subterráneas (manantiales o pozos) para uso doméstico en zonas con una elevada concentración de radón puede suponer un aumento de su concentración en el aire interior especialmente en cuartos de baño donde, con la existencia de agua caliente y en movimiento, el proceso de liberación del gas se ve favorecido.

La presencia del radón en el agua es debida a que ciertas rocas, que contienen uranio natural, liberan radón al agua subterránea con la que entran en contacto, generando concentraciones más elevadas que en las aguas superficiales debido a que en estas últimas el radón se libera al aire atmosférico con facilidad.

A nivel general, en los sistemas públicos de abastecimiento de agua procedente de aguas superficiales la concentración media de radón suele ser menor que 0,4 Bq/l y si el agua procede de fuentes subterráneas el valor ronda los 20 Bq/l de media.

De este modo, el valor máximo recomendado por la OMS y la Comisión Europea por debajo del cual no es necesario realizar controles en abastecimientos públicos es de 100 Bq/l, requiriendo la toma de acciones de reductoras si las concentraciones de radón son mayores a 1.000 Bq/l. En este último caso, según distintas fuentes la concentración de 1.000 Bq/l en el grifo podría llegar a contribuir, en las condiciones más desfavorables, en aumentar la concentración de radón en el aire interior de ciertos espacios en unos 100-200 Bq/m<sup>3</sup>.

### 1.4.5 Otras consideraciones

Por último, es importante destacar que la concentración de radón en las construcciones no sólo depende del tipo de fuente de exposición sino que además depende de otros factores como son la localización geográfica, la altura del piso, la antigüedad, su grado de aislamiento o los hábitos de ventilación de sus habitantes.

A este respecto, la problemática de la acumulación de radón en interiores se ha incrementado debido a las numerosas y recientes políticas de ahorro energético que promueven un completo aislamiento térmico mediante eficientes materiales de construcción.

La consecuencia directa de este aumento de aislamiento, unida a la disminución de la ventilación en las viviendas fundamentalmente en el norte de Europa, es el incremento de la concentración de radón en el interior de las mismas. Una existencia de edificaciones mejor aisladas y poco ventiladas que pueden alcanzar niveles peligrosos de concentración preferentemente en aquellos lugares con una baja ventilación como son sótanos, semisótanos, garajes u otras áreas en contacto directo con el suelo.

Por tanto, también el tipo de construcción y las condiciones de ventilación de los recintos van a determinar la concentración del radón en el interior de los edificios, ocasionando que en construcciones estancas ubicadas en zonas más frías se alberguen niveles de radón considerables en épocas de frío, cuando la ventilación es menor. Situación que se ve agravada con los sistemas de calefacción interior ya que generan depresiones y presiones que favorecen la emanación del radón desde el suelo debido a que la presión de aire en el interior es generalmente menor que la presión en el suelo en torno a su cimentación, actuando la construcción como un elemento de succión del gas.

## **2. Marco normativo relativo a radiaciones naturales y $^{222}\text{Rn}$**

A pesar de que la presencia del radón es bastante relevante en muchos territorios, suponiendo cierto riesgo para la salud de un buen número de ciudadanos, lo cierto es que la regulación sobre este gas es muy reciente o incluso inexistente en determinados países.

La intensa preocupación sobre el radón presente en Estados Unidos ha tardado en generalizarse por Europa, pero poco a poco se está empezando a considerar este fenómeno con la existencia de distintas organizaciones internacionales y europeas encargadas del estudio y control de la radiactividad. Organizaciones que, desde hace algunos años, se han preocupado por esta cuestión mediante la generación de documentos que instan a los diferentes países a adoptar medidas concretas en lo referente a las radiaciones y aconsejan un desarrollo legislativo propio a cada uno de ellos, generándose una normalización progresiva.

Al respecto de las organizaciones intergubernamentales, la "International Commission on Radiological Protection" (ICRP) recomienda, a nivel general, tanto unas bases científicas como unos principios generales de protección radiológica que junto con los estudios sobre los efectos de esas radiaciones llevados a cabo por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) da lugar a una serie de normas globales convenidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), creado por las Naciones Unidas.

Por otra parte, existen también varios organismos internacionales que formulan recomendaciones sobre protección radiológica como son la Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom/UE), la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA) o la Organización Mundial de la Salud (OMS); entidades que generan documentos con principios prácticos globales, facilitando el desarrollo de regulaciones nacionales siendo los propios países los que definan en última instancia sus regulaciones y normas para una mejor aplicación práctica acorde con las condiciones y características propias de sus territorios.

#### ICRP + UNSCEAR → EURATOM / UE / OIEA / EPA / OMS → PAISES

De este modo, un gran número de países han establecido normativas específicas para medir el radón así como programas de reducción de concentraciones en el interior de viviendas, locales o establecimientos públicos. Para ello se han elaborado mapas de contaminación por radón con los que determinar las áreas problemáticas.

Tras los resultados obtenidos no parece que las propuestas normativas se vayan a detener en un futuro ya que en los últimos años se han multiplicado los estudios tanto sobre el radón como los conocidos como NORM ("Naturally Occurring Radioactive Materials") materiales que contengan radionucleidos naturales, en distintos medios y sectores.

A continuación se destacan diferentes regulaciones llevadas a cabo por cada uno de los anteriores organismos en referencia a las radiaciones naturales y relacionadas con el radón ( $^{222}\text{Rn}$ ).

#### 2.1 International Commission on Radiological Protection (ICRP)

- ICRP 39. "Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation". 1984.

- Señala como fuente predominante de exposición en interiores al  $^{222}\text{Rn}$  y genera una serie de recomendaciones a tener en cuenta respecto a esa fuente tanto en situaciones de exposición existente como futura.

- Exposición espacios existentes. Nivel de acción: 400 Bq/m<sup>3</sup>.
- Exposición espacios futuros. Nivel de referencia: 200 Bq/m<sup>3</sup>.

- ICRP 60. "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". 1990.

- Considera la protección del público frente a la radiación natural, y sigue apuntando al  $^{222}\text{Rn}$  como la principal fuente de exposición en interiores.

- Mantiene los conceptos anteriores de nivel de acción con el que es preciso iniciar acciones de remedio en viviendas ya edificadas y el nivel de referencia para edificaciones futuras.

- En el caso de la exposición de trabajadores a fuentes naturales, indica también otras fuentes potenciales adicionales al  $^{222}\text{Rn}$  como son:

- El almacenamiento/las operaciones con materiales con cantidades significativas de isótopos naturales.
- La operación de aviones a reacción y los vuelos espaciales.

- ICRP 65 "Protection against  $^{222}\text{Rn}$  at home and at work". 1993.

- Considera otros lugares además de las minas donde pueden existir concentraciones elevadas de radón, como es el caso de cuevas, túneles y balnearios.

- Recomienda controlar la exposición tanto en viviendas (mediante la intervención) como en lugares de trabajo (mediante la intervención y un control más regular).

- Recomienda unos niveles de acción a partir de los que iniciar intervención:

- Viviendas -----→ entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup>.
- Lugares de trabajo -----→ entre 500 y 1500 Bq/m<sup>3</sup>.

- En viviendas nuevas recomienda que sean diseñadas y construidas de forma que las concentraciones de radón sean tan bajas como sea posible, considerando la fácil incorporación de técnicas de reducción de concentraciones si se diese el caso de que la construcción inicial fallase.

- Establece valores de dosis según los denominados "conversion conventions factors" basados en un factor de ocupación anual de 7.000 h y un factor de equilibrio entre el radón y sus descendientes de 0,4:

- Antes de la ICRP 65: 600 Bq/m<sup>3</sup> -----→ 10 mSv/año.
- Con la ICRP 65: 200 Bq/m<sup>3</sup> -----→ 3 mSv/año.

- Introduce el concepto de "Radon prone areas", es decir, zonas propensas a la acumulación de radón en las que más de un 1% de las viviendas tienen concentraciones de radón diez veces superiores al valor medio nacional. Considera que las acciones emprendidas para disminuir dichas concentraciones en un país sean dirigidas prioritariamente hacia dichas áreas.

- ICRP 82. "Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure". 2001.

- Sigue considerando válidas las recomendaciones de la publicación nº 65 respecto al control de la exposición al radón en viviendas.

- Sugiere a las autoridades nacionales el establecimiento de niveles de intervención/exención para las concentraciones de actividad de isótopos específicos en materiales de construcción.

## 2.2 Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom)

- Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988. Relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción. 1989.
  - En su apartado 3, 'Higiene, Salud y Medioambiente' indica la necesidad de proyectar y construir sin amenaza para la salud de los ocupantes, como consecuencia de partículas o gases peligrosos y la emisión de radiaciones peligrosas.
  - El medioambiente interior debe ser saludable y se tendrán en cuenta como contaminantes el radón y las sustancias radiactivas que emitan radiaciones gamma. Por el momento este requerimiento legislativo no se ha puesto en práctica en nuestro país a la hora de construir nuevos edificios.
- Recomendación 90/143 "Relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios". 1990.
  - Recomienda tanto en viviendas edificadas como en la construcción de nuevas viviendas:
    - Edificio existente ----> Nivel de acción ----> 20 mSv/año dosis efectiva = 400 Bq/m<sup>3</sup> concentración anual radón.
    - Construcción futura --> Nivel de diseño --> 10 mSv/año dosis efectiva = 200 Bq/m<sup>3</sup> concentración anual radón.
  - Establece una especial atención a la adecuada información al público de los niveles a los que está expuesto y de los medios existentes para reducirlos cuando se consideren acciones correctoras; además de suministrar información a los que participen en la construcción de edificios.
  - Cada estado debe garantizar la identificación mediante estudios u otras medidas adecuadas de las actividades laborales en que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o cualquier otra exposición en lugares de trabajo.
  - Las decisiones deben estar basadas en valores medios anuales de calidad con el uso de técnicas de integración y con la existencia de autoridades competentes que velen por su calidad y fiabilidad.
  - Criterios de identificación de zonas de riesgo basados en investigaciones realizadas en base a parámetros como la radiactividad en suelos, la permeabilidad, etc.
- Directiva 96/29. Normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. 1996.
  - Aplicación a actividades profesionales que impliquen exposición tanto a fuentes artificiales de radiación como a fuentes naturales con la aparición del Título VII Incremento significativo de la exposición debida a fuentes naturales de radiación.
  - Cada estado miembro garantizará que se lleve a cabo la identificación, mediante estudios u otras medidas adecuadas, de las actividades que puedan constituir motivo de preocupación.
- Posteriormente la UE ha publicado una serie de documentos para clarificar ciertos aspectos de la Directiva 96/29, principalmente en relación con las industrias no nucleares.
  - Radiation Protection 88. "Recommendations for the implementation of Title VII of BSS concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources". 1997.
  - Radiation Protection 95. "Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally-occurring radionuclides". 1999.
  - Radiation Protection 107. "Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally-occurring radionuclides". 1999.
  - Radiation Protection 112. "Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials". 1999.
  - Radiation Protection 122. "Practical use of the concepts of clearance and exemption. Part II Natural radiation sources". 2002.
- Directiva 98/83 "Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano". 1998.
  - Se aplica por una parte a la calidad de las aguas utilizadas para beber, cocinar, preparar alimentos u otros usos domésticos, sea cual fuere su origen independientemente de que se suministren a través de una red de distribución, o de una cisterna o envasadas en botellas u otros recipientes y por otra se aplica a las aguas utilizadas en empresas alimentarias para fines de fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos o sustancias destinados al consumo humano.
  - No se aplica a aguas minerales naturales reconocidas por las autoridades nacionales competentes, de conformidad con la Directiva 80/777 o a las aguas que son productos medicinales a efectos de la Directiva 65/65.
  - Considera un valor del tritio de 100 Bq/l y una dosis indicativa total excluyendo el tritio, el 40K y los productos de desintegración del radón de 0,10 mSv/año.
- Recomendación 2001/928. Relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable. 2001.
  - Considera la existencia en algunos estados miembros de aguas subterráneas con elevadas concentraciones de radón y con una exposición de la población a dosis elevadas.
  - Conciencia sobre la importancia de la exposición de la población al radón en aguas potables y sobre la adopción de medidas de control. Se considera que el radón en el agua potable es controlable en el sentido físico y técnico, por lo que debe establecerse un sistema apropiado para reducir las exposiciones significativas.
  - Respecto al agua suministrada en el marco de una actividad comercial o pública:
    - Concentración mayor a 100 Bq/l-----> establecer nivel de referencia para iniciar medidas correctoras.



- Concentración mayor a 1000 Bq/l -----> tomar medidas correctoras por razones de protección radiológica.
- Concentración mayor a 0,1 Bq/l (<sup>210</sup>Po) y 0,2 Bq/l (<sup>210</sup>Pb) -----> considerar adoptar medidas correctoras.
- Suministros de agua individual:
  - Concentración mayor a 1000 Bq/l -----> estudio de medidas correctoras. La urgencia de las medidas será proporcional al grado de superación de la concentración de referencia.

### 2.3 Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (International Atomic Energy Agency / IAEA)

- "International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources". 1996
  - En situaciones de exposición crónica al radón recomienda niveles de acción a partir de los que intervenir:
    - Viviendas -----> entre 200 y 600 Bq/m<sup>3</sup> concentración media anual de radón.
    - Lugares de trabajo -----> 1.000 Bq/m<sup>3</sup> concentración media anual de radón.
- Documentos relativos a protección radiológica en industrias y lugares de trabajo con exposición al radón.
  - "Occupational radiation protection in the mining and processing of raw materials". Safety Guide N° RS-G-1.6. Esta guía fue inicialmente publicada en el año 2004 y ha sido editada en español en el año 2009.
  - "Radiation and waste safety in the oil and gas industry". Safety Reports Series n° 34, 2003.
  - "Radiation protection against radon in workplaces other than mines". Safety Reports Series n° 33, 2003.
  - Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials. Safety Reports Series n° 49, 2006.
  - Radiation protection and NORM residue management in the zircon and zirconia industries. Safety Reports Series n° 51, 2007.
- Drafts.
  - "Assessment of occupational radiation protection conditions in workplaces with high levels of exposure to natural radiation".
  - "Protection from occupational radiation exposure due to thorium in industrial operations".

### 2.4 Organización Mundial de la Salud (OMS)

- "Air Quality Guidelines for Europe". 1987.
  - Recomendaciones relativas a la exposición al radón en el interior de viviendas.
  - Adoptar medidas correctoras sencillas -----> concentraciones medias de radón superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>.
  - Adoptar acciones correctivas inmediatas -----> concentraciones medias de radón superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>.
- "Drinking Water Regulations". 1993.
  - Recomendación de un nivel de referencia de dosis (RDL) de

0,1 mSv/año, representando menos de un 5% de la dosis media efectiva atribuible a la radiación natural. Por debajo de este nivel de dosis, el agua de bebida es aceptable para el consumo y no es necesario realizar ninguna actuación.

- Para propósitos prácticos se recomiendan unos valores de referencia de actividad  $\alpha$  total y  $\beta$  total de 0,1 Bq/l y 1 Bq/l respectivamente.

- Revisión "Air Quality Guidelines for Europe". 2000.
  - Adoptar medidas correctoras sencillas -----> concentraciones medias de radón superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>.
- "Guidelines for Drinking-water Quality" 3ª ed. 2004.
  - Recomendación de un nivel de referencia de dosis (RDL) de 0,1 mSv / año.
  - En este caso, para propósitos prácticos se recomiendan unos valores de referencia de actividad  $\alpha$  total y  $\beta$  total de 0,5 Bq/l y 1 Bq/l respectivamente.
  - En el caso de la actividad  $\beta$  total se debería tener en cuenta la contribución del 40K a dicho índice.
  - Deben establecerse controles si la concentración de <sup>222</sup>Rn en abastecimientos públicos de agua excede los 100 Bq/l.
- "Handbook on indoor radon. A public health perspective". 2009.
  - Establece un nivel de referencia de concentración de radon de 100 Bq/m<sup>3</sup>.
  - Trata de corregir el problema a gran escala sugiriendo programas nacionales de radón.
  - Recomendación que se establezcan códigos de edificios según la rentabilidad de los sistemas de prevención de radón en las viviendas nuevas.

### 2.5 Agencia de Protección Ambiental EE.UU. (EPA)

- La EPA y el DHHS (Department of health and human services) emiten una recomendación sobre el radón en viviendas. 1986.
  - Recomendación de iniciar acciones de remedio en concentraciones superiores a 4 pCi/l  $\rightarrow$  150 Bq/m<sup>3</sup>.
  - En el año 1994, se reevaluó esta propuesta y se mantuvo el valor indicado. No obstante se recomendó la mitigación si existían concentraciones entre 70 y 150 Bq/m<sup>3</sup> y especialmente si era factible reducir estos valores por debajo de 70 Bq/m<sup>3</sup>.
- "Code of Federal Regulations-Part 141". National Interim Primary Drinking Water Regulations. 1976.
  - Normativa aplicable principalmente a exposiciones a los radionucleidos naturales e isótopos del Radio.
  - Los niveles máximos de contaminación (MCL) aplicables al agua en el punto de consumo son:
    - 5pCi/l (0,2 Bq/l) suma de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra y <sup>228</sup>Ra.
    - 15 pCi/l (0,6 Bq/l) concentración de actividad  $\alpha$  total, excluyendo Uranio y <sup>222</sup>Rn.
- Propuesta sobre <sup>222</sup>Rn en agua de bebida. 1999.

- Aplicable a sistemas comunitarios que suministren regularmente agua a más de 25 personas, si el agua es subterránea o mezclada con superficial.
- Reducción de niveles de radón en agua a 300 pCi/l (11 Bq/l), si el Estado no desarrolla los denominados Multimedia Mitigation Programs (MMP) para reducir los niveles de radón en aire.
- En caso de desarrollar los MMP, no se deberá suministrar agua con concentraciones superiores a 4pCi/l. Se ha estimado que esta concentración, daría lugar a una concentración de <sup>222</sup>Rn en el aire del interior de la vivienda de 0,4 pCi/l (15 Bq/m<sup>3</sup>).

## 2.6 Legislación Española

- Real Decreto 1630/92 Disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. 1992.
  - Según el apartado 3, 'Higiene, Salud y Medio Ambiente' Anexo I Requisitos Esenciales: Las obras deberán proyectarse y construirse de forma que no supongan una amenaza para la higiene o para la salud de los ocupantes o vecinos, en particular como consecuencia de cualquiera de las siguientes circunstancias:
    - a) Fugas de gas tóxico.
    - b) Presencia de partículas o gases peligrosos en el aire.
    - c) Emisión de radiaciones peligrosas.
    - d) Contaminación o envenenamiento del agua o del suelo.
    - e) Defectos de evacuación de aguas residuales, humos y residuos sólidos o líquidos.
    - f) Presencia de humedad en partes de la obra o en superficies interiores de la misma.
- Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifican, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. 1995.
  - No modifica el apartado anterior.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. 2001.
  - Aplicable a todas las prácticas que presenten un riesgo derivado de las mismas, tanto si su procedencia es de origen artificial como natural.
  - No se aplica a la exposición al radón en las viviendas o a los niveles naturales de radiación, es decir, los radionucleidos contenidos en el cuerpo humano, los rayos cósmicos a nivel del suelo y los radionucleidos presentes en la corteza terrestre no alterada.
  - Se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos de las radiaciones ionizantes, adoptando criterios de estimación de dosis considerados razonables para proteger a las personas.
  - En su título VII se refiere a las exposiciones a fuentes naturales de radiación en actividades laborales en que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o cualquier otra exposición en lugares de trabajo tales como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. 2003.
  - Generado tras la Directiva de la UE 98/83 Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
  - Según la disposición adicional segunda. Muestreo de la radiactividad: "la Dirección General de Salud Pública del Ministerio de Sanidad y Consumo publicará, antes de cinco años desde la entrada en vigor de esta disposición, los muestreos, frecuencias, tipos de análisis y métodos de ensayo para la determinación de los parámetros correspondientes a la radiactividad".
  - Disposición adicional tercera. Muestreo de los parámetros relacionados con los materiales: "Para los casos del cromo, cobre, níquel, plomo y cualquier otro parámetro que la autoridad sanitaria considere que pudiera estar relacionado con los materiales en contacto con el agua de consumo humano, la Dirección General de Salud Pública del Ministerio de Sanidad y Consumo establecerá un método de muestreo armonizado y lo publicará antes de cinco años desde la entrada en vigor de esta disposición. Estos métodos de recogida de muestras deberán lograr que los valores obtenidos como valor medio semanal ingerido por los consumidores obtenidos de muestreos adecuados en grifo del consumidor y de forma representativa."
- Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.
  - No se aplica a las situaciones de exposición al radón en las viviendas, ni a los niveles naturales de radiación, es decir, a los radionucleidos contenidos naturalmente en el cuerpo humano, los rayos cósmicos a nivel del suelo, y la exposición en la superficie de la tierra debida a los radionucleidos presentes en la corteza terrestre no alterada.
  - Los titulares de las actividades laborales en las que existan fuentes naturales de radiación, deberán declarar estas actividades ante los órganos competentes en materia de industria de las Comunidades Autónomas y realizar los estudios necesarios a fin de determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.
    - a) Actividades laborales en las que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público estén expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón o a la radiación gamma o a cualquier otra exposición en lugares de trabajo tales como establecimientos termales, cuevas, minas, lugares de trabajo subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas.
    - b) Actividades laborales que impliquen el almacenamiento o la manipulación de materiales o de resi-

duos, incluyendo las de generación de éstos últimos, que habitualmente no se consideran radiactivos pero que contengan radionucleidos naturales que provoquen un incremento significativo de la exposición de los trabajadores y, en su caso, de miembros del público.

- c) Actividades laborales que impliquen exposición a la radiación cósmica durante la operación de aeronaves.
- Notas Técnicas de Prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
  - NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención. 2003.
    - Se refiere al radón y las radiaciones naturales en términos generales, así como a las fuentes principales de exposición.
  - NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud. Notas Técnicas de Prevención. 2003.
    - Se refiere al radón como fuente de radiación y sus efectos.
  - NTP 607: Calidad de aire interior: contaminantes químicos. Notas Técnicas de Prevención. 2003.
    - Indica guías y valores máximos de contaminantes químicos en el aire exterior.
  - NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. 2003.
    - Se refiere a la naturaleza de las radiaciones ionizantes, procedencia (fuentes naturales o artificiales), características y acción sobre los seres vivos, así como a las medidas y normas de protección frente a las mismas, de acuerdo con el Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (RD 783/2001). Tiene por objeto establecer las normas relativas a la protección de los trabajadores y de los miembros del público contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes según la Ley 251/1964 reguladora de la energía nuclear.
    - Se excluye la exposición a radón en el interior de las viviendas.
  - NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. 2003.
    - En la NTP 614 (apartado anterior) se relacionan las actividades en las que trabajadores y público en general pueden estar expuestos a la inhalación de elementos radiactivos como consecuencia de las fuentes naturales de radiación. En la presente NTP se revisan algunos aspectos concretos de esta exposición laboral.

### 3. Concentración de radón en ambientes interiores

#### 3.1 Procedimientos de medida de radón y sus descendientes

Existen diversas técnicas para medir la concentración del radón y sus descendientes, tanto en los ambientes exteriores como en los espacios interiores, basadas en la detección de la radiación

ionizante emitida durante la desintegración radiactiva del radón o de su progenie.

Algunas de estas técnicas requieren el desplazamiento de pesados equipos al lugar de medida mientras que otras únicamente consisten en colocar pequeños detectores que posteriormente se analizan en el laboratorio. La elección del método de medida depende de los objetivos del estudio a realizar y está condicionada por el instrumental disponible, por el coste y por la duración de la medida.

A menudo se realiza la distinción entre métodos 'instantáneos', que se usan para hacer medidas en corto tiempo (valores instantáneos o puntuales de la concentración de radón existente), y métodos 'de lectura continua', que se utilizan para realizar una media de los valores obtenidos durante largos períodos (semanas o meses). En función del tiempo de muestreo, es posible distinguir tres tipos de medidas:

##### 3.1.1 Métodos instantáneos

Son métodos utilizados para medidas en cortos intervalos de tiempo, inferiores a 20 minutos. Consisten en un pequeño contenedor con un sistema de detección en su interior (célula de centelleo) y, tras haber efectuado la medida, son analizados en el laboratorio para determinar la concentración de radón ambiental.

Este método proporciona datos correspondientes a un momento determinado. Sin embargo, debido a los cambios que experimenta la concentración en función del tiempo y de las condiciones concretas de ventilación, este método no aporta valores representativos que evalúen las tasas promedio de exposición al radón.

##### 3.1.2 Métodos de lectura continua

En ellos se analiza el paso constante de un flujo de aire durante un período de tiempo concreto, registrando la presencia de radón de una manera continua mediante gráficos en tiempo real.

Muy útiles para el estudio de las fluctuaciones de concentración a lo largo del día o de las estaciones del año, permiten incluso obtener relaciones entre la concentración de radón ambiental y las actividades desarrolladas en el edificio; aún así, son métodos muy voluminosos y debido a su elevado precio están limitados a tareas de investigación.

##### 3.1.3 Métodos integrados

Son aquellos que permiten obtener información sobre las concentraciones promedio durante un cierto tiempo (días, semanas o meses). Son métodos asequibles y se convierten en los más utilizados para estudios de inspección y reconocimiento, permitiendo decidir sobre la necesidad de tomar acciones correctoras (siempre habiendo efectuado medidas de tres meses de duración como mínimo).

Estos equipos de medida pueden clasificarse en dos grupos: de período corto (medida de unos días) y de período largo (medida de unos meses). Entre los primeros, se encuentran los detectores

de carbón activo y entre los segundos, cabe citar los detectores de trazas. La cámara electret puede considerarse tanto de período corto como largo, en función de la elección que se haga.

- Cámara de carbón activo: el detector es una caja de reducidas dimensiones que contiene carbón activo, donde se queda adsorbido el radón del ambiente. El tiempo de exposición de estos detectores varía entre 2 y 7 días, no debiendo prolongarse más debido al período de desintegración del radón. La medida en el laboratorio se debe realizar en las 24 horas posteriores a la recogida del detector.
- Cámara electret: está formado por una cámara con un disco detector electrostáticamente cargado (electret). Durante el proceso de medida, la desintegración del radón y su progenie reduce el voltaje de la superficie del detector y, posteriormente, un factor de calibración relaciona esta caída de tensión con la concentración de radón existente en el espacio estudiado. El tiempo de exposición de estos detectores suele ser de 3 a 12 meses en medidas integradas para obtener concentraciones medias; aún así, también es posible realizar medidas de 3 a 7 días en determinados casos.
- Detectores de trazas: es uno de los métodos más frecuentes para realizar medidas de período largo. Está basado en el efecto (huella o traza), sobre el material plástico (nitrato de

celulosa, carbonato o policarbonato) alojado en el interior del contenedor, que producen las partículas emitidas por el radón y sus descendientes al desintegrarse. El tiempo de exposición de estos detectores suele ser de 3 a 12 meses en medidas integradas cuando se necesita obtener un valor promedio de las concentraciones de radón.

### 3.2 Datos de concentración de radón en ambientes interiores en distintos países

A continuación, se recogen datos de concentración de radón en espacios interiores según algunos estudios realizados en distintos países, donde se tienen en cuenta parámetros tales como el tipo de detector elegido, su ubicación en el edificio y la duración temporal del estudio.

En unos casos, el dato se presenta como media aritmética, calculada según la expresión:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

mientras que en otros casos se presenta como media geométrica, calculada según la expresión:

$$\bar{x} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$$

■ **Tabla 3. Valores de la concentración de radón en viviendas (Bq/m<sup>3</sup>) aportados por distintas publicaciones.**

Edificio	Concentración <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Detector	Duración estudio	País	Ubicación	Bibliografía
Viviendas	103 (geom.) 116,5±56,6 (aritm.)	Electret	1 año	México	-	Morales, O. Y. Et Al. 2009.
Viviendas	136 (geom.) 229 (aritm.)	Detector de trazas	6 meses	Rumania	-	Sainz, C. Et Al. 2009.
Viviendas	85 (geom.) 98 (aritm.)	Detector de trazas	6 meses	España	-	Sainz, C. Et Al. 2009.
Viviendas	36±2 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Grecia	-	Psichoudaki, M. Et Al. 2008.
Viviendas	32-40 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Pakistán	Sótano	Rahman, S.U. Et Al. 2008.
Viviendas	27-30 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Pakistán	Planta baja	Rahman, S.U. Et Al. 2008.
Viviendas	27-29 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Pakistán	Primer piso	Rahman, S.U. Et Al. 2008.
Viviendas	69,5 (geom.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Barros-Dios, J.M. Et Al. 2007.
Viviendas	1.453 (geom.) 1.851 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Sainz, C. Et Al. 2007.
Viviendas	529 (geom.) 1.163 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Serbia	-	Zunic, Z.S. Et Al. 2007.
Viviendas	15,5 (aritm.)	-	-	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Viviendas	64 (aritm.)	Células de centelleo	Instantánea	Serbia	Planta baja	Popović, D. Et Al. 2006.
Viviendas	40 (aritm.)	Células de centelleo	Instantánea	Serbia	Primer piso	Popović, D. Et Al. 2006.
Viviendas	29 (aritm.)	Células de centelleo	Instantánea	Serbia	Segundo piso o más	Popović, D. Et Al. 2006.
Viviendas	23 (geom.) 33 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	Argentina	-	Canoba, A.C. Et Al. 1998.
Viviendas	34,0 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	España	-	Amorós, R. Et Al. 1995.
Viviendas	116 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	España	-	Quindós, L.S. Et Al. 1995.

### 3.2.1 Viviendas

En la Tabla 3 se muestran los datos de concentración de radón en espacios interiores ( $Bq/m^3$ ) de viviendas en diversos países según las distintas publicaciones.

### 3.2.2 Lugares de trabajo

En la Tabla 4 se recogen los datos de concentración de radón en espacios interiores ( $Bq/m^3$ ) de lugares de trabajo en diversos países según las distintas publicaciones.

■ **Tabla 4. Valores de la concentración de radón en lugares de trabajo ( $Bq/m^3$ ) aportados por distintas publicaciones.**

Edificio	Concentración $^{222}Rn$ ( $Bq/m^3$ )	Detector	Duración estudio	País	Ubicación	Bibliografía
Mina turística	4.800	Detector de trazas	3 meses	Argentina	-	Anjos, R.M. Et Al. 2010.
Escuelas	52±9	Detector de trazas	1 año	Pakistán	-	Matiullah, R. Et Al. 2010.
Varios lugares de trabajo	82 (geom.) 95±51 (aritm.)	Electret	3 meses	Grecia	-	Papachristodoulou, C.A. Et Al. 2010.
Lugares de trabajo subterráneos	92±36 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	Pakistán	Sótano	Rahman, S.U. Et Al. 2010.
Lugares de trabajo subterráneos	58±30 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	Pakistán	Planta baja	Rahman, S.U. Et Al. 2010.
Varios lugares de trabajo	64±32 (geom.)	Detector de trazas	6 meses	Pakistán	Primer piso	Rahman, S.U. Et Al. 2010.
Escuelas	209 (geom.) 214 (aritm.)	Detector de trazas + electret	6 meses	Italia	Sótano	Trevisi, R. Et Al. 2010.
Escuelas	216 (geom.) 329 (aritm.)	Detector de trazas + electret	6 meses	Italia	Planta baja	Trevisi, R. Et Al. 2010.
Lugares de trabajo universidad	253±3 (geom.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Cortina, D. Et Al. 2008.
Cueva turística	95±4	Detector de trazas	4 meses	España	-	Font, Ll. Et Al. 2008.
Mina	139±6	Detector de trazas	9 meses	España	-	Font, Ll. Et Al. 2008.
Edificios públicos	1.356 (geom.) 3.073 (aritm.)	Detector de trazas	3 meses	España	-	Sainz, C. Et Al. 2007.
Lugares de trabajo subterráneos	213	Detector de trazas	1 año	China	Lugares subterráneos/ túneles/ párking	Li, X. Et Al. 2006.
Oficinas	22,6±17,0 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Fábricas	10,1±8,3 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Escuelas	28,4±24,5 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Hospitales	19,8±24,4 (aritm.)	Detector de trazas	1 año	Japón	-	Oikawa, S. Et Al. 2006.
Pirámide	178±14 (aritm.) 179±13 (aritm.)	Detector de trazas+ Electret	3 meses	México	-	Espinosa, G. Et Al. 2005.
Cueva de Altamira	3.456	Detector de trazas	1 año	España	-	Lario, J. Et Al. 2005.
Cueva de Altamira	3.562	Medida en continuo	1 año	España	-	Lario, J. Et Al. 2005.

## 4. Reflexiones sobre hormigón y radón

Por una parte, como se ha comprobado en el primer artículo publicado del presente trabajo, existe una amplia bibliografía sobre la radiación externa emitida por algunos de los materiales más utilizados en la construcción. Así, obteniendo los valores de las concentraciones de actividad de los isótopos naturales  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  existentes en los distintos materiales del mercado se puede calcular, de manera común, un índice de concentración de actividad (I) con el que poder compararlos de una forma objetiva.

Por otra parte, también existen múltiples datos relacionados con los valores de concentración de radón ambiental ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) en espacios interiores, por ejemplo: mapas nacionales e internacionales de las zonas más expuestas al radón, estudios sobre regiones geográficas concretas o trabajos localizados en puntos especialmente conflictivos por sus altas concentraciones ambientales. Bibliografía que también ha querido ser representada en la Tabla 3 y la Tabla 4 del presente artículo mediante una pequeña muestra de valores nacionales y extranjeros, tanto en el interior de viviendas como en lugares de trabajo.

También es importante destacar que el documento "Radiation Protection 112" considera que, a nivel general, los materiales de construcción pueden aportar un 20% del valor total de la concentración ambiental de radón en el interior de las edificaciones. Esto representa, aproximadamente, una aportación comprendida entre  $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$  y  $20 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , lo que constata que la mayor aportación es la proveniente del propio terreno natural donde se ubica la construcción.

Por tanto, a nivel global se puede afirmar que la aportación a la concentración de radón ambiental interior debida a los materiales de construcción tiene una repercusión baja respecto al valor total. Un razonamiento que también puede ser extrapolable al caso concreto del hormigón.

Con el fin de profundizar en esta cuestión, en la actualidad el grupo de investigación Materiales y Sistemas Constructivos de la Edificación de la Universidad de Alicante está llevando a cabo estudios a este respecto que se espera que concluyan en breve.

Así, si se considera el terreno como fuente principal de aporte de radón ambiental, su permeabilidad intrínseca se puede clasificar en baja, media o alta según los siguientes valores:

- Permeabilidad baja  $<4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ .
- Permeabilidad media entre  $4 \cdot 10^{-13}$  y  $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

- Permeabilidad alta  $>4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Según sea la permeabilidad del terreno baja, media o alta, la concentración de radón  $^{222}\text{Rn}$  en dicho terreno podría considerarse con un determinado valor en  $\text{Bq}/\text{m}^3$  según se indica en la Tabla 5 y, por tanto, la exposición potencial al radón de una vivienda ubicada en ese lugar a su vez podría ser catalogada como baja, media o alta.

Si se realiza el mismo razonamiento al respecto del hormigón, el valor medio de su permeabilidad intrínseca es de  $0,1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ , es decir 10.000 veces inferior a la de un terreno calificado con permeabilidad baja. De este modo, incluso cuando el hormigón presenta microfisuras, su permeabilidad intrínseca puede llegar a valores del orden de  $0,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ , que aún siguen siendo valores 40 veces menores a los de un terreno de permeabilidad baja.

Además, debido a su elevada compacidad, se puede destacar que el hormigón es un material adecuado para ser utilizado en la envolvente de edificios sometidos a importantes emisiones de gas radón provenientes del terreno.

Otro aspecto a considerar es que el radón puede recorrer antes de desintegrarse, en el suelo normal, una longitud de un metro, razón por la que se investiga una profundidad similar en el terreno en el que se va asentar la construcción, para determinar la exposición potencial que afectará al edificio.

La longitud de difusión del radón en el hormigón suele situarse entre 10 y 20 cm, lo que también confiere a éste una capacidad de protección.

Por tanto, el empleo de hormigón en las edificaciones junto con una ventilación frecuente, tanto natural como artificial (como medida de extracción y por razones de higiene), mejoran la protección frente a la acción de este gas en construcciones ubicadas en zonas sometidas a importantes concentraciones de radón ambiental. Protección que se incrementará notablemente cuando se utilicen, en la parte de la envolvente en contacto con el terreno, membranas que actúen contra el paso del gas radón como elementos de barrera.

## 5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a D. José Luis Martín Matarranz, del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), las correcciones realizadas y el aporte de material bibliográfico al presente trabajo.

■ **Tabla 5. Exposición potencial al radón en un solar a partir de los datos de concentraciones de radón en profundidad y permeabilidad intrínseca del terreno. (Fuente: Frutos, B. et al. (2010)).**

Exposición potencial al radón	Concentración en el terreno del $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )		
	Permeabilidad baja	Permeabilidad media	Permeabilidad alta
Baja	$<30.000$	$<20.000$	$<10.000$
Media	$30.000-100.000$	$20.000-70.000$	$10.000-30.000$
Alta	$>100.000$	$>70.000$	$>30.000$

Parte de la presente investigación se ha realizado gracias a una ayuda económica del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

## 6. Bibliografía específica

Amorós, R.; Bolta, J. M.; Navarro, E.; Roldán, C. "Radon levels in the valencian community (Spain). Results in the province of Valencia (1990-991)". *Journal Of Environmental Radioactivity*. Vol. 27, Nº 2, Pp. 125-131, 1995.

Anjos, R.M.; Umisedo, N.; Da Silva, A.A.R.; Estellita, L.; Rizzotto, M.; Yoshimura, E.M.; Velasco, H.; Santos, A.M.A., "Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis province, Argentina". *Journal of Environmental Radioactivity*. Nº 101, Pp. 153-158, 2010.

Ardila, J. *Radiactividad Natural: El Radón*. Publicación Online. Junio, 2007. Web: [www.laem.es/documentos/radiacnaturalradon.Pdf](http://www.laem.es/documentos/radiacnaturalradon.Pdf)

Barreiro, M<sup>a</sup> A. "A exposición ao radón e seus descendentes en domicilios e edificios públicos". Curso: actualización del gas radón como factor de riesgo ambiental para la salud humana: Implicaciones de las administraciones, de los profesionales y de los ciudadanos. Noia, 2008.

Barros-Dios, J.M.; Ruano-Ravina, A.; Gastelu-Iturri, J.; Figueiras, A. "Factors underlying residential radon concentration: results from Galicia, Spain". *Environmental Research*. Nº 103, Pp. 185-190, 2007.

Canoba, A. C.; Arnaud, M. I.; López, F. O.; Oliveira, A. A. Mediciones de gas radón en el interior de viviendas de la República Argentina. Publicado como PI-16/98 de la Autoridad Regulatoria Nuclear. Argentina, 1998.

Cembureau. "Radon And Radioactivity In Buildings". The European Cement Association, 1999.

Cortina, D.; Durán, I.; Llerena, J. J. "Measurements of indoor radon concentrations in the Santiago de Compostela area". *Journal of environmental radioactivity*. Nº 99, Pp. 1583-1588, 2008.

CSN. Dosis de radiación. Consejo De Seguridad Nuclear. Madrid, 2010.

Ebensperger, L.; Torrent, R. "Medición in situ de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo". *Revista Ingeniería de Construcción*. Vol. 25, Nº 3. Diciembre, 2010.

Espinosa, G.; Golzarri, J. I.; Martínez, T.; Navarrete, M.; Bogard, J.; Martínez, G.; Juárez, F. "Indoor <sup>220</sup>Rn and <sup>222</sup>Rn concentration measurements inside the Teotihuacan pyramids using ntd and e-perm methodologies". *Radiation Measurements*. Nº 40, Pp. 646-649, 2005.

Fernández, L.; Torrent, R.; Castillo, A. La mediación in situ de la permeabilidad al aire: una herramienta para el diagnóstico y el control de la calidad de ejecución.

Figueiras, A. Los mapas de radón. experiencias internacionales. El caso del mapa de radón de Galicia: Planificación y ejecución de un estudio de revalencia sobre exposición domiciliaria al radón. Universidad de Santiago de Compostela, 2010. Web: [www.usc.es/radongal/actualizacions/11\\_prevalencia\\_radon.pdf](http://www.usc.es/radongal/actualizacions/11_prevalencia_radon.pdf).

Font, Ll.; Baixeras, C.; Moreno, V. "Indoor radon levels in underground workplaces of catalonia, Spain". *Radiation Measurements*. Nº 43, Pp. S467-S470, 2008.

Frutos, B. Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones. E.T.S. Arquitectura Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2009.

Frutos, B.; Olaya, M. Protección frente a la emisión de gas radón en edificios. Publicado Como Nº 24. 2010. Colección de Informes Técnicos. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Madrid, 2010.

IAEA. "International Basic Safety Standards for protection against ionizing radiation and for safety of radiation sources". International Atomic Energy Agency. Viena, 1994.

ICRP. "Recommendations".

Lario, J.; Sánchez-Moral, S.; Cañaveras, J.C.; Cuezva, S.; Soler, V. "Radon continuous monitoring in altamira cave (northern Spain) to Assess user's annual effective dose". *Journal of environmental radioactivity*. Nº 80, Pp. 161-174, 2005.

Li, X.; Zheng, B.; Wang, Y.; Wang, X. "A Survey of radon level in underground buildings in China". Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang. China. 2006.

Martín, J. L. El marco legislativo y la radiación natural. Consejo De Seguridad Nuclear. Iv Workshop Radón Y Medioambiente. Suances, 2005.

Matiullah, R; Anwar, J.; Jabbar, A.; Rafique, M. "Indoor Radon survey in 120 schools situated in four districts of the Punjab province Pakistan". *Indoor and built environment*. Nº 19, Pp. 214, 2010.

Morales, O. Y.; Martínez, T.; González, P.; Navarrete, M.; Cabrera, L.; Ramírez, A. "Indoor Radon levels and gamma-radiation in dwellings of the metropolitan zone of Guadalajara". *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 280, Nº 2, Pp.431-437, 2009.

NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.

NTP 533: El Radón y sus efectos sobre la salud. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.

- NTP 607: Calidad de aire interior: contaminantes químicos. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.
- NTP 614: Radiaciones ionizantes. Normas de protección. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.
- NTP 728: Exposición laboral a radiación natural. Notas técnicas de prevención. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Madrid, 2003.
- Oikawa, S.; Kanno, N.; Sanada, T.; Abukawa, J.; Higuchi, H. "A survey of indoor workplace radon concentration in Japan". *Journal of environmental radioactivity*. Nº 87, Pp. 239-245, 2006.
- Papachristodoulou, C. A.; Patiris, D. L.; Ioannides, K. G. "Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in north-western Greece". *Radiation Measurements*. Nº 45, Pp. 865-871, 2010.
- Popović, D.; Todorović, D. "Radon indoor concentrations and activity of radionuclides in building materials in Serbia". *Facta Universitatis. Series: physics, chemistry and technology*. Vol. 4, Nº 1, Pp. 11-20, 2006.
- Psichoudaki, M.; Papaefthymiou, H. "Natural radioactivity measurements in the city of Ptolemais" (Northern Greece). *Journal of environmental radioactivity*. Nº 99, Pp. 1011-1017, 2008.
- Quindós, L. S. Radón: un gas radiactivo de origen natural en su casa. Consejo de Seguridad Nuclear y Universidad de Cantabria. Santander, 1995.
- Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J. "A method for the measurement of the emanation factor for  $^{222}\text{Rn}$  in small samples of porous materials". *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 56, Nº 1-4, Pp. 171-174, 1994.
- Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J. "Study of areas of Spain with high indoor radon". *Radiation measurements*. Vol. 24, Nº 2, Pp. 207-210, 1995.
- Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J.; Ródenas, C.; Gómez, J.; Arteche, J. "Natural radioactivity of cements and granites in Spain". *Annales de l'Association Belge de Radioprotection*. Vol. 19, Nº 1-2, Pp. 289-298, 1994.
- Quindós, L. S.; Newton, G. J. "Estimation of indoor  $^{222}\text{Rn}$  from concrete". *Health Physics*. Vol. 56, Nº 1, Pp. 107-109, 1989.
- Rahman, S. U.; Anwar, J.; Matiullah, J. A. "Measurement of indoor radon concentration levels in Islamabad, Pakistan". *Radiation Measurements*. Nº 43, Pp. 401-404, 2008.
- Rahman, S. U.; Rafique, M.; Matiullah, J. A. "Radon measurement studies in workplace buildings of the Rawalpindi region and Islamabad capital area, Pakistan". *Building and Environment*. Nº 45, Pp. 421-426, 2010.
- Real Decreto 1328/1995, de 28 de julio, por el que se modifica, en aplicación de la Directiva 93/68/CEE las Disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, aprobadas por el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre. Madrid, 1995.
- Real Decreto 140/2003, De 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE Nº 45. Madrid, 2003.
- Real Decreto 1630/92 de 29 de diciembre por el que se dictan las disposiciones para la libre circulación de productos de construcción. BOE Nº 34. Madrid, 1992.
- Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes. BOE Nº 178. Madrid, 2001.
- Real, G. El Radón. Tratamiento jurídico de un enemigo invisible. Editorial Club Universitario. Alicante, 2002.
- Risica, S. "Legislation on radon concentration at home and at work. Radiation protection dosimetry, Vol. 78, No 1, Pp. 15-21. Nuclear Technology Publishing, 1998.
- Risica, S.; Bolzan, C.; Nuccetelli, C. "Radioactivity in building materials: experimental methods, calculations and an overview of the Italian situation". *Radon in the living environment*, Nº 19. Abril. Atenas, 1999.
- Sainz, C.; Dinu, A.; Tiberius Dicu, T.; Szacsvai, K.; Cosma, C.; Quindós, L. S. "Comparative risk assessment of residential radon exposures in two radon-prone areas, Ştei (Romania) and Torrelodones (Spain)". *Science of the total environment*. Nº 407, Pp. 4452-4460, 2009.
- Sainz, C.; Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Gómez, J.; Fuente, I.; Quindós, L.; Matarranz, J. L. "High background radiation areas: the case of Villar de la Yegua village (Spain)". *Radiation Protection Dosimetry*. Nº 125(1-4), Pp. 565-567, 2007.
- Steger, F.; Kunsch, B.; Buchner, I. Önorm S 5200. "Radioactivity in building materials (A Standard In Austria To Limit Natural Radioactivity In Building Materials)". *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 45. Nº 1/4, Pp. 721-722. Nuclear Technology Publishing, 1992.
- Tevisi, R.; Caricato, A.; D'alexandro, M.; Fernández, M.; Federica Leonardi, F.; Armando Luches, A.; Tonnarini, S.; Veschetti, M. "A pilot study on natural radioactivity in schools of south-east Italy. Environment International. Nº 36, Pp. 276-280, 2010.
- UE. Directiva 89/106/CEE del Consejo de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción, 1988.



---

UE. Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. Diario Oficial N° L 159 De 29/06/1996.

UE. Directiva 98/83/Ce del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Diario Oficial N° L 330 De 5/12/98.

UE. Draft European Basic Safety Standards Directive. Versión 24 Febrero, 2010.

UE. Radiation Protection 88. "Recommendations for the implementation of Title VII of bss concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources", 1997.

UE. Radiation Protection 112. "Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials", 1999.

UE. Radiation Protection 122. "Practical use of the concepts of clearance and exemption. part II natural radiation sources", 2002.

UE. Recomendación 2001/928 de la Comisión de 20 de diciembre de 2001 relativa a la protección de la población contra la exposición al Radón en el agua potable. Diario Oficial N° L 344 De 28/12/2001.

UE. Recomendación 90/143/Euratom de la Comisión de 21 de febrero de 1990 relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. Diario Oficial N° L 080 De 27/03/1990.

Unsclear 2006. Report Vol. I. "Effects of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Nueva York, 2008.

Unsclear 2008 Report Vol. I. "Sources of ionizing radiation". United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Nueva York, 2010.

WHO. "Air quality guidelines for Europe". WHO Regional Publications, European Series, No. 91. Copenhagen, 2000.

WHO. Recomendaciones organización mundial de la salud. Web: [www.who.int/ionizing\\_radiation/env/radon/en](http://www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en).

WHO. "Handbook on indoor radon. A public health perspective". WHO. France, 2009.

Zunic, Z. S.; Yarmoshenko, I. V.; Birovljev, A.; Bochicchio F. et Al. "Radon survey in the high natural radiation region of Niska Banja, Serbia". Journal of Environmental Radioactivity. N° 92, Pp. 165-174, 2007.